

A. S. EDDINGTON

PROFESSEUR D'ASTRONOMIE A L'UNIVERSITÉ DE CAMBRIDGE

ESPACE, TEMPS ET GRAVITATION

LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALISÉE DANS SES GRANDES LIGNES

EXPOSÉ RATIONNEL

SUIVI D'UNE ÉTUDE MATHÉMATIQUE DE LA THÉORIE

OUVRAGE TRADUIT DE L'ANGLAIS PAR

J. ROSSIGNOL

ÉLÈVE A L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE

AVEC UNE INTRODUCTION DE

P. LANGEVIN

PROFESSEUR AU COLLÈGE DE FRANCE

PARIS

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE J. HERMANN

6, RUE DE LA SORBONNE, 6

1921

CHAPITRE XII

SUR LA NATURE DES CHOSES.

Cette harmonie que l'intelligence humaine croit découvrir dans la nature, existe-t-elle en dehors de cette intelligence ? Non, sans doute, une réalité complètement indépendante de l'esprit qui la conçoit, la voit ou la sent, c'est une impossibilité. Un monde si extérieur que cela, si même il existait, nous serait à jamais inaccessible. Mais ce que nous appelons la réalité objective, c'est, en dernière analyse, ce qui est commun à plusieurs êtres pensants, et qui pourrait être commun à tous ; cette partie commune, nous le verrons, ce ne peut être que l'harmonie exprimée par des lois mathématiques.

H. POINCARÉ (*La Valeur de la Science*).

Les résultats auxquels aboutit la théorie de la relativité sont basés sur deux principes que nous avons énoncés — le principe de relativité restreinte et le principe d'équivalence. On peut les résumer sous cette forme unique : les mouvements uniformes et les champs de force sont essentiellement relatifs. Sous leur forme plus explicite ce sont des généralisations expérimentales que l'on peut accepter ou rejeter ; si on les accepte, tous les résultats que l'observation nous a fournis peuvent être déduits mathématiquement sans qu'il y ait besoin de faire intervenir les théories sur l'espace, le temps ou la force, exposées dans cet Ouvrage. Sous plusieurs rapports c'est là l'aspect le plus séduisant de l'œuvre d'Einstein ; de deux principes généraux seulement et avec l'aide d'une méthode de calcul extrêmement puissante, Einstein a pu déduire l'explication de nombre de phénomènes remarquables ; il laisse de côté toutes les questions de mécanisme, les considérant comme étrangères à sa théorie. Malheureusement le développement de cette théorie ne peut être exposé que dans un traité technique.

Pour éviter l'analyse mathématique nous avons eu recours à des illustrations géométriques parallèles au développement mathématique et qui nous permettent de le comprendre jusqu'à un certain point. Mais une question se pose : ces représentations sont-elles de simples illustrations du raisonnement mathématique, ou bien de véritables images de ce qui se passe réellement dans la nature ? Sans aucun doute, le moyen le plus simple et le plus sûr serait d'éviter les questions épineuses que soulève ce problème et de dire qu'il nous suffit que ces illustrations puissent remplacer correctement le raisonnement mathématique. A mon avis, un tel argument donnerait une idée fausse des progrès que la théorie de la relativité a fait faire à la science.

Le physicien, tant qu'il raisonne en physicien, a une croyance bien arrêtée dans la réalité du monde extérieur. Ainsi, il a foi dans l'existence réelle des atomes et des molécules ; pour lui, ce ne sont pas de simples fictions qui lui donnent le moyen de comprendre certaines lois des combinaisons chimiques. Il a pu en être ainsi dans les débuts de la théorie atomique, mais maintenant, l'atome est dans l'Univers du physicien une entité dont l'existence est amplement démontrée. Cette affirmation n'est en rien incompatible avec le doute philosophique sur le sens de la réalité finale.

Aussi, quand on vient nous demander si l'Univers à quatre dimensions ne peut pas être considéré simplement comme une illustration de la méthode mathématique, nous devons immédiatement penser que notre interlocuteur a vraisemblablement un motif sérieux pour nous poser cette question. Il croit à la réalité de l'Univers euclidien à trois dimensions, et il espère qu'on l'autorisera à ne pas sacrifier sa croyance. En ce cas, notre réponse doit être nette ; l'Univers réel à trois dimensions, tombé en désuétude, doit être remplacé par un espace-temps quadridimensionnel à propriétés non euclidiennes. Dans ce Livre, nous avons eu parfois recours à des images qui ne correspondent sûrement à aucune réalité physique — le temps imaginaire ou encore une cinquième dimension que nous n'avons jamais perçue. L'Univers à quatre dimensions n'est pas une simple image ; c'est l'Univers réel du physicien, auquel on est arrivé par la méthode bien connue que la physique (à tort ou à raison) a toujours suivie dans sa recherche de la réalité.

J'ai devant les yeux un certain objet et je vois tracée l'image de Britannia ; un autre observateur, regardant cet objet sous une autre face, aperçoit le portrait d'un monarque ; un troisième ne voit qu'un mince rectangle. Dois-je dire que c'est l'image de Britannia qui est l'objet réel, et que les impressions brutes perçues par les autres observateurs doivent être corrigées en tenant compte de leurs positions respectives ? Tous ces aspects différents sont aisément explicables car l'objet observé — ici, un penny — a trois dimensions ; nul être doué de raison n'oserait mettre en doute que le penny soit ici la réalité objective correspondant à ces aspects différents. Supposons de même qu'un observateur terrestre reconnaisse à un certain bloc qu'il a sous les yeux une forme oblongue, et que cette impression lui soit confirmée par la mesure ; un observateur situé sur une autre étoile trouve au contraire que le même bloc est cubique. Disons-nous que l'objet est réellement oblong et que l'observateur stellaire doit corriger sa mesure en tenant compte de son mouvement ? Tous les aspects de l'objet sont explicables si celui-ci a quatre dimensions, car les différents observateurs n'en ont sous les yeux que des aspects ou des sections tridimensionnelles ; il semble impossible de mettre en doute que ce soit là l'explication véritable. Celui qui doute de la réalité de l'Univers à quatre dimensions (pour des raisons de pure logique par opposition aux raisons expérimentales) peut être comparé à l'homme qui doute de la réalité du penny et qui préfère considérer l'une de ses apparences possibles comme l'objet réel.

La réalité physique est la synthèse de tous les aspects physiques possibles de la nature. Nous pouvons en trouver un exemple dans les phénomènes de l'énergie rayonnante ou de la lumière. Dans certains cas, la lumière émise par un atome prend l'apparence d'une série d'ondes qui se déroulent et qui s'étalent jusqu'à pouvoir remplir nos télescopes les plus volumineux. Dans d'autres phénomènes, cette même lumière nous apparaît sous l'aspect d'un quantum élémentaire d'énergie qui, pénétrant dans un seul atome, peut le faire exploser. Peut-être nous trompons-nous dans ces déductions expérimentales ; sinon, il nous faut admettre que la réalité physique qui correspond à la lumière doit être une synthèse englobant ces deux aspects particuliers. Le moyen d'effectuer cette synthèse a toujours échappé

à notre conception ; la leçon que nous en pouvons tirer, c'est qu'un très grand nombre d'apparences — par exemple toutes celles que perçoivent directement des observateurs terrestres — peuvent se combiner pour former un tout bien déterminé mais que ce tout peut néanmoins n'être encore lui-même qu'une apparence. La réalité n'est obtenue que lorsqu'on fait entrer dans la combinaison tous les points de vue imaginables.

C'est la raison pour laquelle nous avons dû renoncer à la réalité de cet Univers à trois dimensions qui nous est familier. Jusqu'à ces derniers temps, il réalisait la combinaison de toutes les apparences observées ; mais on découvrit de nouveaux points de vue donnant des apparences nouvelles que la réalité devait également englober. C'est en combinant aux anciens tous ces nouveaux points de vue qu'il a été possible de connaître la nature de l'Univers objectif de la physique.

Récapitulons rapidement les différentes phases de cette synthèse. Nous avons trouvé que l'une d'elles était déjà accomplie. La perception directe de l'Univers avec un seul œil est une apparence bidimensionnelle ; nos deux yeux nous fournissent une combinaison des aspects que prend l'Univers quand on l'observe de deux positions différentes. Notre cerveau, par un processus mystérieux, effectue la synthèse et nous donne la notion du relief ; c'est ainsi que nous obtenons l'apparence courante de l'Univers à trois dimensions. Elle suffit à tous les besoins d'un observateur qui peut occuper toutes les positions possibles des régions connues de l'espace. La phase suivante est la combinaison de tous les aspects de l'Univers pour un observateur qui peut prendre toutes les vitesses uniformes possibles. Le résultat, c'est l'addition d'une dimension supplémentaire à l'Univers qui devient ainsi un Univers à quatre dimensions. Puis la synthèse se poursuit en y faisant entrer tous les mouvements variables possibles de l'observateur. On ne peut plus ajouter de dimension nouvelle, mais l'Univers devient non euclidien ; une géométrie nouvelle, celle de Riemann est adoptée. Enfin interviennent les points de vue d'observateurs de grandeur arbitrairement variable, et l'on aboutit au remplacement de la géométrie de Riemann par la géométrie plus générale dont nous avons parlé dans le dernier chapitre.

La recherche d'une réalité physique, sans avoir nécessaire-

ment un but utilitaire, n'aura pas été sans profit. Plus la géométrie devenait compliquée, plus au contraire la physique se simplifiait ; il semble même que la géométrie ait presque fini par absorber la physique. Nous n'avions nullement l'intention de construire une théorie géométrique de l'Univers ; mais c'est au cours de la recherche d'une réalité physique par des méthodes éprouvées que cette théorie géométrique prit naissance.

Le point que nous avons atteint, est-ce le but final ? Avons-nous fait intervenir les points de vue de tous les observateurs imaginables ? Nous ne pouvons l'affirmer. Il semble néanmoins qu'une étape a été définitivement franchie. Tous les points de vue impersonnels possibles, à notre connaissance, ont été englobés dans notre synthèse — tous ceux pour lesquels l'observateur peut être regardé comme un automate et remplacé par des instruments de mesure scientifiques. Il serait peut-être nécessaire, pour parvenir à l'objectivité suprême, de faire appel à toute une catégorie de points de vue plus personnels ; mais c'est à grand-peine que nous saurions leur trouver une place dans l'Univers réel de la physique. Ici donc nous pouvons nous arrêter, mais nous n'avons pas le droit de nous arrêter plus tôt.

On peut se demander s'il est vraiment indispensable de faire entrer en ligne de compte tous les observateurs imaginables, nombre d'entre eux n'ayant, c'est probable, aucune existence. L'Univers *réel* n'est-il pas celui qui réalise la synthèse de ses aspects pour tous les observateurs *réels* possibles ? Qu'elle soit soutenable ou non cette hypothèse que ce que nul n'observe n'existe pas, la science la repousse fermement. Nier les droits des observateurs extra-terrestres, c'est prendre parti pour l'Inquisition contre Galilée. Mais si on les admet, ces observateurs extra-terrestres, les autres observateurs dont les résultats sont ici combinés ne peuvent pas être exclus.

Notre recherche de la nature des choses est soumise à certaines limitations qu'il importe de bien préciser. La meilleure comparaison que je puisse trouver est celle de recherches archéologiques futures faites par exemple vers l'an 5000. Je suppose que l'on ait fait une découverte extrêmement intéressante, concernant une civilisation, florissante vers le vingtième siècle, mais disparue depuis longtemps, en l'espèce un livre où se trouvent décrites un grand nombre de parties d'échecs, dans le lan-

gage symbolique obscur que l'on a coutume d'employer à ce sujet. Les archéologues pour qui le jeu était jusqu'alors inconnu, finiront par découvrir certaines répétitions ; finalement, après de longues et patientes recherches, ils réussiront à établir, d'une manière absolument indubitable, la règle du jeu et le mouvement des pièces. Mais il est évident qu'en aucun moment l'étude du livre n'aura donné d'indications sur la nature des objets qui participent au jeu — les pièces — ni sur celle du champ d'action de la partie — l'échiquier. Tout ce qu'il est possible de faire au sujet des pièces, c'est de leur donner des noms arbitraires permettant de les distinguer les unes des autres d'après leurs propriétés respectives ; en ce qui concerne l'échiquier, on peut faire plus. La matière dont il est fait est inconnue ; inconnue également la forme des cases — on ne sait si ce sont des carrés ou des losanges ; néanmoins, il est certain que les différents points de ce champ de bataille sont liés les uns aux autres comme les éléments d'une multiplicité à deux dimensions et que l'on peut concevoir un grand nombre d'échiquiers satisfaisant à ces relations. Malgré ces lacunes dans leurs connaissances, nos archéologues ont parfaitement le droit de dire qu'ils possèdent à fond la règle du jeu.

L'analogie est la suivante. Les parties d'échecs décrites ce sont nos expériences physiques. Les règles du jeu que l'étude de ces expériences permet de fixer, ce sont les lois de la physique. L'échiquier hypothétique à soixante-quatre cases, c'est l'espace-temps de quelque observateur ou joueur particulier ; ici, les relations les plus générales correspondent à une multiplicité à deux dimensions ; là, ce sont les relations absolues déjà rencontrées, qui unissent les éléments de la multiplicité quadridimensionnelle de l'espace-temps. Les pièces du jeu d'échecs deviennent des entités de la physique — électrons, particules ou points-événements ; peut-être même pouvons-nous comparer l'échiquier lui-même aux champs de force ou aux relations entre ces entités — champs électriques et gravitationnels, ou bien intervalles. L'étude expérimentale ne peut absolument rien nous apprendre sur la nature et même sur l'apparence de ces entités. Mais cette connaissance est étrangère à la question car nous pouvons nous en passer pour apprendre le « jeu » avec toutes ses combinaisons. Notre science de la nature des

choses doit ressembler à la connaissance que nos archéologues auraient de la nature des pièces : ils les regarderaient comme des éléments du jeu, pions ou pièces, et non comme des figures de bois sculptées. Sous ce dernier aspect, au contraire, les choses peuvent présenter des rapports et des significations dépassant tout ce que l'on a pu imaginer en physique.

Il semble bien que les objets les plus familiers de l'expérience sont extrêmement complexes, et la méthode scientifique consiste à les décomposer en éléments plus simples. Ce sont les théories et les lois relatives à ces constituants plus simples que l'on étudie ; à partir de ces théories et de ces lois il devient possible de prédire et d'expliquer les phénomènes. Il semble tout naturel d'expliquer le complexe par le simple, mais cela entraîne la nécessité d'expliquer le familier par ce qui ne l'est plus.

Il y a deux raisons pour lesquelles les constituants ultimes de l'Univers réel doivent être d'une nature qui ne nous est pas familière. D'abord parce que tous les objets qui nous sont familiers sont d'un caractère trop complexe. Ensuite ces objets familiers appartiennent non pas à l'Univers réel mais à un stade beaucoup moins avancé de la synthèse des apparences. Les éléments primordiaux de la théorie de l'Univers doivent être d'une nature dont il est impossible de donner une définition intelligible.

Le mathématicien ne trouve aucune difficulté à raisonner sur des entités dont il ignore la nature. Comme le Mathématicien que nous avons rencontré dans le Prologue, il n'est jamais si heureux que quand il ne sait pas de quels objets il parle. Mais nous, nous ne pouvons trouver d'intérêt à la chaîne des raisonnements qu'il nous présente que lorsqu'il nous est possible de lui donner une signification — signification qui nous est fournie par l'expérience, bien entendu ; notre rôle doit être de commenter à mesure les résultats qu'il obtient. Au début, ses symboles n'offrent à nos yeux aucune image et nous devons, tout en l'observant, garder le silence. Puis, peu à peu, nous pouvons dire : « Ah ! Voilà qu'il parle d'une particule matérielle »... « Il est question maintenant d'une autre particule »... « Il fixe l'endroit où elles seront toutes les deux à telle époque »... « Il affirme qu'à tel moment elles se trouveront au même point ». — Nous chercherons à vérifier. — « Oui, les

deux particules se sont effectivement heurtées. Pour une fois, ce qu'il dit nous est familier et ses prévisions sont exactes, mais, bien entendu, il n'en sait rien ». Il est évident que c'est la chaîne de ses symboles qui peut être interprétée comme décrivant ce qui se passe dans l'Univers ; nous n'avons pas besoin, et en fait nous ne le faisons pas, de trouver une signification à chacun d'eux ; seules, certaines de leurs combinaisons nous semblent reconnaissables.

Ainsi, bien que les concepts élémentaires de la théorie soient, par leur nature même, indéfinissables, nous devons faire correspondre les concepts qui en dérivent aux objets familiers de l'expérience.

Nous allons maintenant rassembler les résultats auxquels nous sommes arrivés par échelons successifs dans les chapitres précédents et donner à la théorie un ordre plus logique. La généralisation traitée au Chapitre XI ne sera pas envisagée dans ce nouvel exposé, d'abord parce qu'elle rendrait moins facilement saisissables les idées fondamentales, ensuite parce qu'elle n'est pas encore établie avec un degré de certitude suffisant.

Dans la théorie de la relativité, le concept le plus élémentaire, c'est le *point-événement*. En langage ordinaire, un point-événement n'est autre qu'un certain point de l'espace considéré à un certain instant ; mais ce n'est là qu'un aspect du concept et ce que nous venons de dire ne doit pas être pris comme définition. Le temps et l'espace — les termes qui nous sont familiers — sont des notions dérivées que nous n'introduirons que beaucoup plus tard dans la théorie. Les premiers concepts simples sont nécessairement indéfinissables et ils dépassent l'intelligence humaine. L'ensemble des événements constitue l'*Univers*. On accorde à l'Univers quatre dimensions, ce qui signifie qu'un événement particulier doit être défini par les valeurs de quatre variables ou coordonnées, ces quatre nombres pouvant être choisis d'une manière entièrement arbitraire.

Le sens de cette proposition que l'Univers a quatre dimensions n'est pas aussi clair qu'il le paraît à première vue. L'ensemble d'un grand nombre d'objets n'a en lui-même aucun nombre particulier de dimensions. Considérons, par exemple, les mots imprimés sur cette page. Si l'on jette les yeux sur la page, on n'y voit qu'une distribution à deux dimensions de ces

mots ; pourtant, ils ont été écrits dans l'espoir que le lecteur voudra bien les regarder comme ordonnés suivant une dimension unique. Pour fixer le nombre des dimensions, nous devons nous baser sur quelque relation fixant l'ordre des éléments considérés, et le résultat dépend essentiellement de la nature de cette relation — par exemple, la distribution des mots sur cette page peut être faite suivant un ordre de signification, ou bien simplement suivant un ordre de position. Dire que l'Univers a quatre dimensions c'est donc le rapporter implicitement à quelque relation d'ordre. Cette relation paraît être l'*intervalle*, mais je ne suis pas sûr qu'elle suffise à elle seule, et peut-être est-il nécessaire de lui adjoindre quelque relation répondant à une idée de *proximité*. Il ne faut pas oublier en effet que si l'intervalle s entre deux événements est petit, il n'en résulte pas nécessairement que ces deux événements soient voisins au sens ordinaire du mot.

Entre deux événements voisins quelconques, il existe un certain lien commun qui a reçu le nom d'*intervalle*. C'est une relation quantitative susceptible de prendre toute une échelle de valeurs numériques ⁽¹⁾. Mais il ne faut pas se baser sur le mot « intervalle » pour en conclure l'objectivité de cette relation, car celle-ci est entièrement inaccessible à notre raison. Les propriétés géométriques de l'intervalle, sur lesquelles nous sommes arrêtés tant de fois dans les chapitres précédents, ne nous donnent qu'un aspect de la relation ; elle peut en avoir d'autres associés à des caractères de l'Univers qui ne soient plus du domaine de la physique. Mais ce qui intéresse le physicien, ce n'est pas la nature de cette relation, c'est le nombre qu'on lui assigne pour exprimer sa grandeur ; et ceci nous suggère une représentation graphique qui nous conduit à une théorie géométrique de l'Univers physique.

Ce que nous venons d'appeler l'*Univers* aurait peut-être pu tout aussi bien recevoir le nom d'*éther* ; c'est, en tout cas, un substratum universel que la théorie de la relativité substitue à l'éther.

⁽¹⁾ Il existe également une distinction qualitative en intervalles dans le temps et en intervalles dans l'espace, qui, dans le raisonnement mathématique, se caractérisent par des valeurs réelles ou des valeurs imaginaires de s .

Nous avons vu que le nombre qui exprime la grandeur de l'intervalle peut pratiquement se mesurer au moyen de règles graduées et d'horloges. Je crois qu'il est bien peu probable que nos mesures grossières puissent arriver à saisir les intervalles individuels des événements ponctuels, car elles ne sont pas suffisamment microscopiques. L'intervalle, tel qu'il nous est apparu dans notre analyse, doit donc avoir une valeur *macroscopique* ; les potentiels et genres d'espace que l'on en déduit sont des moyennes pour des régions petites sans doute même par rapport à l'électron, mais contenant encore un nombre extrêmement grand d'intervalles primordiaux. Nous en arrivons donc immédiatement à la considération de l'intervalle macroscopique ; seulement, nous n'anticiperons pas sur des résultats que nous établirons ultérieurement, en supposant cet intervalle mesurable avec une règle graduée et une horloge. Cette propriété doit être introduite dans un ordre logique.

Considérons une région très petite de l'Univers. Elle contient un nombre extrêmement grand (infini peut-être) de points-événements qui, deux à deux, sont séparés par des intervalles. Si nous nous donnons d'une part les intervalles entre un point A et un nombre suffisant d'autres points, d'autre part les intervalles entre ces derniers et un point B, pouvons-nous calculer la valeur de l'intervalle qui sépare A de B ? Dans la géométrie ordinaire le problème serait possible ; mais, comme dans le cas présent nous ignorons tout de la relation que désigne le mot intervalle, il nous est impossible de prédire quelque loi *a priori*. Cependant, nous avons trouvé plus haut qu'une telle règle existait, et qu'elle se traduisait par la formule :

$$ds^2 = g_{11}dx_1^2 + g_{22}dx_2^2 + \dots + 2g_{12}dx_1dx_2 + \dots$$

Ceci signifie que, les nombres (x_1, x_2, x_3, x_4) étant attribués aux points-événements, nous n'avons qu'à faire la mesure de dix intervalles différents pour être à même de déterminer les dix coefficients g_{11} , etc., qui, dans une région très petite, peuvent être assimilés à des constantes ; cette détermination faite, notre formule nous permet de prévoir la valeur de n'importe quel intervalle de la région considérée. Si l'on passe à une autre région, il faut opérer de nouvelles mesures analogues et déterminer les nouveaux coefficients de la formule.

Je crois qu'il est fort peu probable que les intervalles *individuels* de points-événements obéissent à une règle aussi bien définie. Un examen microscopique nous les montrerait sans doute comme entièrement arbitraires, les intervalles individuels de points dits intermédiaires n'ayant pas nécessairement eux-mêmes des valeurs intermédiaires. Peut-être même l'intervalle primordial n'est-il pas susceptible de variation continue, et est-il simplement égal à un pour certains couples de points-événements, et à zéro pour certains autres. La formule que nous avons donnée n'est qu'une formule de moyennes qui correspond à nos méthodes grossières d'investigation et qui n'est vraie que statistiquement. Les moyennes statistiques d'une collectivité peuvent différer de celles d'une autre ; de même cette formule statistique applicable dans une certaine région peut ne plus l'être dans une autre. Telle est la cause de l'infinie variété de la nature.

Peut-être un exemple rendra-t-il la question plus claire. Comparons les points-événements à des personnes et les intervalles aux liens d'amitié qui les unissent deux à deux. Il n'y a pas moyen de prévoir le degré d'amitié de A pour B, connaissant les liens d'amitié qui unissent respectivement A et B à C, D, E, etc... On peut dans chaque collectivité établir une sorte de loi statistique. Dans la plupart des cas A et B à la fois connaissent C, ce qui accroît légèrement la probabilité que A et B se connaissent également. Une collectivité dans laquelle tous les individus sont étroitement liés les uns aux autres, est dite un *clan*. Il peut y avoir sous ce rapport des différences entre les collectivités, suivant le degré d'union qui existe dans le clan ; par suite, les lois statistiques permettent d'exprimer les différences intrinsèques entre les diverses collectivités.

Mais là se présente une difficulté qui nous est maintenant familière. Les dix g ne dépendent pas seulement des propriétés intrinsèques de l'Univers, mais aussi du système arbitraire des nombres qui servent à repérer les points-événements ; ou, comme nous l'avons vu, ils ne servent pas seulement à décrire le genre d'espace-temps, mais encore à fixer la nature du système de coordonnées en usage. Les mathématiques nous indiquent le moyen de tourner cette difficulté en nous conseillant

l'emploi d'expressions appelées tenseurs dont $B_{\mu\nu\sigma}^{\rho}$ et $G_{\mu\nu}$ sont des exemples.

Un tenseur ne donne pas explicitement la mesure d'une propriété intrinsèque de l'Univers ; un genre quelconque de système de coordonnées est indispensable pour la mesure d'une telle propriété, sauf dans certains cas spéciaux où elle est exprimable par un nombre pur que l'on appelle un invariant ; ce cas se présente pour l'intervalle et pour la courbure totale. Mais dire qu'un tenseur s'annule ou qu'il est égal à un autre tenseur dans la même région, c'est énoncer une propriété intrinsèque entièrement indépendante du système de coordonnées choisi. Donc, par l'emploi exclusif des tenseurs, nous obligeons nos formules à dépeindre des caractères intrinsèques de l'Univers.

Dans cette voie, nous avons trouvé deux formules absolues qui semblent pleinement confirmées par l'observation, à savoir :

$$\begin{array}{ll} \text{dans un espace vide,} & G_{\mu\nu} = 0, \\ \text{dans un espace contenant de la matière,} & G_{\mu\nu} = K_{\mu\nu}, \end{array}$$

où $K_{\mu\nu}$ renferme certaines grandeurs physiques qui nous sont des plus familières : la densité et l'état du mouvement de la matière dans la région considérée.

Je crois que l'interprétation habituelle de ces équations est la suivante : la première exprime une loi de la nature d'après laquelle les points-événements sont naturellement contraints de régler leurs liaisons de manière à se conformer à cette équation. Mais, quand la matière intervient, elle est la cause de perturbations entraînant des modifications dans ces liens naturels, et il s'établit un nouvel équilibre conformément à la deuxième équation.

Voyons d'un peu plus près ce que nous apprend l'équation $G_{\mu\nu} = 0$. Le mathématicien a eu toute liberté d'action avec ses points-événements et ses intervalles indéfinissables. Il a abouti à la quantité $G_{\mu\nu}$ qui pour nous, jusqu'ici, n'a absolument aucun sens. Le mathématicien pur abandonné à lui-même, jamais ne s'écarter de son chemin pour donner une signification à ce qu'il fait. Jamais ses travaux ne se rapportent aux objets familiers qui nous entourent à moins que nous ne mettions résolument la main sur ses symboles pour leur donner

des significations intelligibles — cette attribution se fait d'abord à titre d'essai, puis elle passe au définitif quand on a trouvé qu'elle était compatible avec l'expérience. Nous avons décidé que dans un espace vide $G_{\mu\nu}$ s'annulerait ; c'est pour nous l'occasion d'interpréter l'égalité $G_{\mu\nu} = 0$. A défaut d'une autre interprétation nous dirons que cette égalité *signifie* que là où elle est valable, il y a le vide ; ainsi, dire que $G_{\mu\nu}$ n'est pas nul, c'est caractériser un espace qui n'est pas vide. Jusqu'ici, $G_{\mu\nu}$ n'est qu'une sorte de forme générale appelée à se remplir d'un contenu indéfinissable ; et, plus que jamais, nous sommes parfaitement incapables d'expliquer ce que peut être ce contenu ; seulement nous avons donné maintenant au tableau que nous avons tracé une signification intelligible dont nous nous souviendrons chaque fois que nous le rencontrerons au cours de nos expériences.

Les deux équations ne sont par suite que de simples définitions — définitions des impressions que nous avons de certains états de l'Univers (mais décrits en termes indéfinissables). Quand nous percevons que telle région de l'Univers est vide, c'est simplement que nos sens reconnaissent que cette région n'a pas une courbure d'un degré supérieur au premier. Si au contraire nous avons la sensation que la région contient de la matière, c'est que nous y reconnaissons une courbure intrinsèque de l'Univers ; quand nous croyons évaluer la masse et la quantité de mouvement de la matière (relatives à quelque système d'axes de référence), c'est en réalité certaines composantes de la courbure d'Univers (rapportée à ces axes) que nous mesurons. Les moyennes statistiques de propriétés inconnues, dont nous nous sommes servis dans la description de l'Univers, varient d'un point à un autre ; ce sont ces moyennes qui nous ont permis de concevoir les notions familières de matière et de vide.

La loi de gravitation n'est pas une loi, si l'on entend par ce mot une limitation de la manière dont peut se comporter le substratum universel ; ce n'est simplement qu'une définition du vide. Nous n'avons pas besoin de considérer la matière comme une entité étrangère, cause de perturbations dans le champ de gravitation ; la perturbation, c'est la matière elle-même. De même, nous n'avons pas à regarder la lumière

comme une intruse dans le champ électromagnétique, contraignant le vecteur électromagnétique à osciller sur son parcours, car ce sont ces oscillations mêmes qui constituent la lumière. Non plus que la chaleur n'est un fluide produisant l'agitation des molécules d'un corps ; l'agitation moléculaire, c'est la chaleur elle-même.

La matière est un indice et non une cause ; c'est là une idée qui paraît si naturelle qu'il est surprenant qu'on l'ait perdue de vue dans l'exposé habituel de la théorie. La raison en est que la correspondance de l'analyse mathématique avec les objets de l'expérience est établie ordinairement non pas en déterminant ce qu'est la matière, mais en se fondant sur les effets de certaines de ses combinaisons. C'est pourquoi l'intervalle s'est trouvé immédiatement identifié avec une propriété expérimentale qui nous est familière : l'entité que l'on mesure avec une règle graduée et une horloge. Quels que soient les avantages que puisse présenter cette identification pour mettre en contact la théorie avec l'expérience, il est bien peu probable que nous puissions arriver à bâtir une théorie de la nature des choses en prenant pour concepts inanalysables primordiaux la règle divisée et l'horloge. Le résultat de cette inversion dans l'ordre logique, c'est qu'au moment où nous avons rencontré l'équation $G_{\mu\nu} = K_{\mu\nu}$, les deux membres de cette relation étaient des quantités bien définies ; on ne prit pas garde à leur identité *nécessaire*, et l'équation devint une nouvelle loi de la nature. La faute, ce fut d'introduire trop tôt la règle graduée et l'horloge. A notre avis, il nous semble préférable de définir tout d'abord la matière au moyen des concepts élémentaires de la théorie ; nous pouvons alors introduire n'importe quel genre d'appareil scientifique et finalement déterminer la propriété de l'Univers que mesure cet appareil.

La matière définie de cette manière obéit à toutes les lois de la mécanique, y compris celles de la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. En exposant d'une manière analogue la théorie plus générale de Weyl sur la combinaison du champ de gravitation et du champ électrique, nous trouverions que cette même matière a les propriétés électriques et optiques que nous lui connaissons. C'est une hypothèse entièrement gratuite de supposer qu'il existe quelque chose dans l'Univers qui

se conforme aux relations des quatorze potentiels (les g et les k) et qui ne soit pas identique à ces relations.

On ne peut exiger de la matière qu'une qualité nouvelle. Nos cerveaux sont constitués par de la matière ; or ils sentent et ils pensent — ou du moins la sensation et la pensée sont étroitement liées aux mouvements et aux changements de la matière dans nos cerveaux. Il serait bien difficile de dire qu'une hypothèse quelconque sur la nature de la matière puisse rendre ces processus plus ou moins compréhensibles ; on ne pourrait pas dire non plus qu'un cerveau constitué par les coefficients différentiels des fonctions g serait moins capable de penser et de sentir qu'un autre formé, par exemple, par de minuscules boules de billard ! Mais je crois que l'on peut même aller un peu au-delà de cette justification négative. La relation d'intervalle primordiale est d'une nature impossible à définir et les g contiennent cet élément indéfinissable. L'expression $G_{\mu\nu}$ est donc d'une *forme* définie, mais son *contenu* est indéterminé. C'est par sa forme seule qu'elle doit rendre compte de toutes les propriétés physiques de la matière ; jamais l'investigation physique ne pourra pénétrer au-dessous de la forme. Or, la matière du cerveau, sous son aspect physique, c'est la forme ; son essence même, c'est le contenu. Nous ne pouvons rien attendre de la forme pour expliquer l'activité du contenu, pas plus que nous pouvons attendre du nombre 4 quelque explication de l'œuvre du Conseil des Quatre à Versailles !

Quelques-unes de ces vues sur la matière, l'esprit remarquablement pénétrant de W.-K. Clifford les avait déjà émises par anticipation il y a une quarantaine d'années. Pendant que les autres physiciens anglais perdaient leur temps avec des atomes-tourbillons ou couraient après d'autres feux-follets, Clifford était absolument convaincu que la matière et le mouvement n'étaient que des aspects de la courbure d'espace *et rien de plus*. Il n'était pas moins convaincu que ces notions géométriques ne sont que des aspects partiels des relations que présentent entre eux ce qu'il appelait des « éléments de sensation ». — « La réalité correspondant à notre perception du mouvement de la matière est un élément de l'ensemble complexe que nous appelons une sensation. Ce que nous pourrions percevoir comme un plexus d'agitations nerveuses, n'est à vrai dire qu'une seule

sensation ; la conscience humaine, produit de l'ensemble de nos sensations, c'est la réalité qui cause dans notre esprit la perception des mouvements de notre cerveau. Ces éléments de sensation présentent entre eux des relations de *proximité* ou de contiguïté dans l'espace, comme nous en avons un exemple dans la perception visuelle de points contigus, et des relations de succession dans le temps, que l'on rencontre dans tous les genres de perception. C'est en partant de ces deux catégories de relations que le théoricien futur devra, du mieux qu'il le pourra, édifier la Théorie de l'Univers. Deux choses, peut-être, pourront l'aider. Il y a un long chapitre de la pensée mathématique qui montre que la distance ou toute autre quantité peuvent être regardées comme des fonctions de *position*, ce dernier mot étant pris avec le sens large qu'il a dans l'*analysus situs*. D'autre part la théorie de la courbure de l'espace fait entrevoir qu'il est possible de décrire la matière et son mouvement en ne parlant que d'extensions. » (*Fortnightly Review*, 1875).

L'équation $G_{\mu\nu} = K_{\mu\nu}$ ressemble à un dictionnaire qui nous donnerait la signification des composantes de la courbure d'Univers dans le langage courant de la mécanique. Si nous écrivons cette équation sous la forme légèrement différente, mais équivalente :

$$G_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} G = -8\pi T_{\mu\nu}$$

le tableau suivant nous permet d'en faire l'interprétation :

$$\begin{array}{ccccccc} T_{11}, & T_{12}, & T_{13}, & T_{14} = & p_{11} + \rho u^2, & p_{12} + \rho uv, & p_{13} + \rho uw, & -\rho u \\ & T_{22}, & T_{23}, & T_{24} & & p_{22} + \rho v^2, & p_{23} + \rho vw, & -\rho v \\ & & T_{33}, & T_{34} & & & p_{33} + \rho w^2, & -\rho w \\ & & & T_{44} & & & & \rho \end{array}$$

Nous utilisons là les divisions d'espace et de temps adoptées dans la mécanique ordinaire ; ρ est la densité de la matière, u, v, w sont les composantes de sa vitesse, $p_{11}, p_{12}, \dots, p_{33}$ les composantes des tensions internes que l'on croit être la cause des mouvements moléculaires.

Mais est-il légitime d'opérer ainsi en gros ces identifications ? Une fois T_{44} identifié avec la densité avons-nous le droit d'identifier une autre quantité, T_{34} par exemple, avec le produit de

la densité par une vitesse ? C'est comme si nous identifions une « chose » avec de l'*air* et une « chose » entièrement différente avec du *vent*. Oui, c'est légitime, parce que jusqu'ici nous n'avons pas dit quel était l'équivalent de la vitesse dans notre schéma de l'Univers ; et tel est le moyen que nous choisissons pour l'introduire. Toutes les identifications en sont encore au stade provisoire puisqu'aucune n'a été soumise à l'épreuve expérimentale.

La définition de la vitesse de la matière comme une quantité analogue ou « quotient du *vent* par l'*air* » ne correspond pas au mouvement tel qu'il se manifeste à nous dans l'expérience. Le mouvement se reconnaît généralement par la disparition d'une particule en un certain point et la réapparition d'une particule d'apparence identique en un point voisin. Cette manifestation du mouvement peut être déduite mathématiquement de la définition par identification donnée précédemment. Si nous nous rappelons que dans la théorie physique il est nécessaire de procéder du simple au complexe, ce qui est souvent en opposition avec notre désir instinctif de partir des choses qui nous sont familières pour aboutir à celles qui ne le sont pas, cette inversion dans l'ordre où nous apparaissent ordinairement les manifestations du mouvement ne doit nous causer aucune surprise. L'identité permanente des particules de matière entre elles (indispensable à notre notion ordinaire de la vitesse) est une idée qui nous est extrêmement familière, mais il semble que ce soit un des caractères les plus complexes de l'Univers.

On peut donner un exemple simple montrant l'insuffisance de la conception courante du mouvement. Supposons qu'un anneau parfaitement homogène et continu tourne comme une roue ; quelle signification pouvons-nous donner à son mouvement ? La conception cinématique ordinaire implique un changement quelconque — disparition en un point, réapparition en un autre point — ; or, aucun changement ne peut être mis en évidence. L'état à un moment quelconque est identique à l'état d'un moment antérieur et l'on ne peut distinguer la matière occupant une certaine position de celle qui avait la même position un moment auparavant. Tout au plus y a-t-il une certaine qualité mystérieuse et non physique — l'identité — qui ne se soit pas conservée ; mais si, comme le pensent nom-

bre de physiciens, la matière n'est qu'un état particulier de l'éther, que peut-on bien vouloir dire quand on affirme que deux états sont exactement semblables et ne sont pas identiques ? La température d'une salle peut-elle être égale à la température qu'elle possédait la veille sans lui être identique ? Au point de vue cinématique, le mouvement de rotation de l'anneau nous apparaît donc comme dépourvu de toute signification ; pourtant, mécaniquement, l'anneau tournant diffère de l'anneau fixe ; ainsi, il est doué de propriétés gyrostatiques. Le fait que l'anneau a une structure atomique discontinue intervient à peine dans cette question. Il faut qu'il existe une conception du mouvement permettant de distinguer l'anneau homogène et continu qui tourne de l'anneau fixe ; sinon, en effet, ce serait une preuve *a priori* de la structure atomique de la matière. Précisément, dans sa conception nouvelle, la vitesse de la matière est tout autant une qualité statique que la densité. En général, la vitesse est accompagnée de changements dans l'état physique de l'Univers, qui nous fournissent les moyens habituels de révéler son existence ; néanmoins l'exemple donné plus haut nous montre que ces indices ne se rencontrent pas nécessairement.

Cette définition de la vitesse nous permet de voir pourquoi une vitesse n'a de sens que si on la rapporte à de la matière, alors qu'au contraire l'accélération et la rotation avaient une signification même sans cette référence. Cet argument philosophique qu'une vitesse à travers l'espace ne signifie rien, cesse d'être applicable si l'on accorde une certaine structure aux régions vides, autrement dit si l'on admet qu'il y a un éther ; le problème n'est donc pas si simple qu'on le suppose bien souvent. Seulement, notre définition de la vitesse est dynamique et non cinématique. La vitesse, c'est le rapport de certaines composantes de $T_{\mu\nu}$ deux à deux ; elle n'existe que si T_{44} n'est pas nul. La matière (ou l'énergie électromagnétique) est donc la seule chose qui puisse avoir une vitesse par rapport au système de référence. La vitesse de la structure d'Univers, ou éther, c'est-à-dire des régions où $T_{\mu\nu}$ s'annule, est de la forme indéterminée $\frac{0}{0}$. Au contraire, l'accélération et la rotation sont définies au moyen des $G_{\mu\nu}$; elles existent partout où ceux-ci

existent ⁽¹⁾ ; la structure d'Univers ou éther a par suite une accélération et une rotation bien déterminées par rapport au système de référence. Remarquons que l'accélération n'est pas définie comme un taux de variation de la vitesse ; c'est une entité indépendante beaucoup plus simple et d'un caractère bien plus universel que la vitesse. Pour finir, c'est par la comparaison de ces deux entités que l'on arrive à la définition du temps.

Nous trouvons enfin la solution de la difficulté rencontrée au Chapitre X, — la différence apparente que présente le principe de relativité quand il est appliqué au mouvement uniforme, ou au mouvement non uniforme. En principe, la vitesse et l'accélération sont toutes deux des qualités statiques d'une région de l'Univers (rapportée à un certain système de coordonnées). L'accélération est une qualité relativement simple qui existe là où il y a une structure géodésique, c'est-à-dire partout. La vitesse est une qualité bien plus complexe que l'on ne rencontre que là où la structure est elle-même plus compliquée que partout ailleurs, c'est-à-dire là où il y a de la matière. Ce sont ces deux qualités qui, ordinairement, causent les manifestations physiques auxquelles sont plus particulièrement appliqués les mots accélération et vitesse ; mais, c'est en examinant leur signification fondamentale que l'on peut se rendre compte de l'universalité de l'une et du caractère particulier de l'autre.

Nous avons établi l'existence de quatre identités qui lient entre elles dix des différentes qualités d'un fragment de matière et qui ne dépendent que de la manière dont on a défini la formation des $G_{\mu\nu}$ à partir des éléments plus simples. Ces quatre identités expriment que, *pourvu que le système de coordonnées soit choisi convenablement*, la masse (ou l'énergie) et la quantité de mouvement se conservent. La conservation de la masse est d'une grande importance ; la matière subsiste et, pour toute particule qui disparaît en un point, il apparaît une masse équivalente en un point voisin ; le changement

(1) Même dans la mécanique newtonienne, il est question du « champ d'accélération », et l'on en conçoit l'existence sans même qu'il y ait de corps d'épreuve pour mettre cette accélération en évidence. Dans la théorie précédente, ce champ d'accélération est dépeint par les $g_{\mu\nu}$. Dans un espace vide, il n'y a rien d'analogue pour « un champ de vitesse » ; celui-ci n'existe que dans la matière.

consiste en un déplacement de la matière, et non en sa création ou sa destruction. Ceci donne à la matière le droit d'être regardée, non pas comme un pur assemblage de symboles, mais comme la substance d'un Univers indestructible. Seulement, cet Univers permanent nécessite une division de l'espace-temps faite sur un des modes établis au Chapitre III ⁽¹⁾. Parmi ces différents modes, l'observateur choisit un espace-temps particulier car il désire se considérer, lui, ou bien quelque autre objet arbitraire, comme au repos. Ceci nous donne l'espace et le temps tels que nous les rencontrons dans la description ordinaire de nos expériences. Nous pouvons de cette manière introduire dans l'Univers à quatre dimensions l'espace et le temps de notre perception, c'est-à-dire les concepts dérivés que nous faisons dépendre de notre volonté de considérer comme permanente la matière telle que nous venons de l'entendre.

Je crois qu'il est maintenant possible de voir la raison pour laquelle l'Univers doit nécessairement revêtir la forme que nous lui avons trouvée. Quand nous avons le spectacle d'un océan agité, ce n'est pas la particule tourbillonnante de l'eau qui attire notre attention, c'est la vague que nous voyons parce qu'elle offre un certain degré de permanence. Le mouvement que nous remarquons plus spécialement c'est celui de la forme qui constitue la vague, et qui n'est pas du tout un mouvement de l'eau.

De même, ce qui arrête le regard de l'observateur ⁽²⁾ qui con-

⁽¹⁾ Quand l'espace-temps est d'un genre tel que l'on ne peut en faire une division rigoureuse suivant l'un des modes voulus, la conservation rigoureuse n'existe pas non plus ; mais, pour que le principe soit formellement satisfait, on attribue une énergie et une quantité de mouvement au champ de gravitation.

⁽²⁾ Jusqu'ici nous utilisons le mot « observateur » pour désigner son corps et ses appareils de mesure ; nous avons fait jouer à son esprit un rôle ni plus ni moins important que dans les autres théories physiques. Pour la première fois, maintenant, nous avons égard au fait que les propriétés de l'Univers extérieur que discute la physique sont des propriétés qui ont été choisies par l'esprit. Le principe de la sélection doit être une loi de l'esprit ; les lois de la nature qui dépendent de cette sélection peuvent être regardées comme imposées par l'esprit. Ainsi, l'esprit, dans notre théorie, est comparable à un tyran qui fonde ses lois sur l'Univers qu'il perçoit. Ce n'est là qu'une moitié du problème car c'est à peine s'il est nécessaire de faire remarquer qu'une loi de l'esprit n'est

temple l'Univers des points-événements, c'est ce qui est permanent. Les relations plus simples, telles que les intervalles et les potentiels, sont transitoires au contraire et elles ne sont pas d'une consistance suffisante pour que l'esprit se risque à les prendre pour s'en faire une demeure. Mais ce que nous avons identifié avec la matière est permanent et, à cause de cette permanence, ce doit être pour nous la substance de l'Univers. Pratiquement, aucun autre choix n'était possible.

Il faut remarquer que la conservation de la masse n'est pas rigoureusement équivalente à la permanence de la matière. Si tout à coup un pain vient à se transformer en un chou, notre surprise n'en sera point diminuée parce que le poids se sera conservé. Il n'est pas commode de caractériser le fond de cette permanence théorique parce que nous regardons comme parfaitement naturelles certaines transformations qui, en apparence, ne diffèrent pas beaucoup de la précédente — transformation d'un œuf en omelette, ou du radium en plomb. Il semble du moins évident que c'est la permanence d'une seule qualité, la masse, que l'on devrait regarder comme caractéristique dans la matière, et ceci explique suffisamment le choix de l'identification que nous avons faite.

En résumé, nous voyons que le choix d'une substance permanente pour l'Univers de notre perception entraîne nécessairement comme conséquences la loi de la gravitation, toutes les lois de la mécanique et enfin l'introduction de l'espace et du temps qui entrent dans nos expériences. Toute notre théorie n'a été en réalité qu'une discussion de la manière la plus générale dont nous puissions édifier une substance permanente sur de simples relations ; c'est la raison qui, ne voulant regarder que ce qui est permanent, a en réalité imposé toutes ces lois à un Univers complètement indifférent. La nature n'a eu que fort peu de rapports avec la matière ; son rôle unique a été de nous four-

autre qu'une loi à laquelle l'esprit doit lui-même obéir. Il est naturel de penser que la prédisposition de l'esprit à ne considérer que ce qui est permanent doit être un caractère acquis par la sélection naturelle ; les esprits qui, aujourd'hui, ne présentent pas ce caractère sont confiés aux asiles d'aliénés, et dans les premiers jours du « struggle for life » ils n'auraient pas eu le loisir de faire longtemps leur « mea culpa ». Mais nous n'avons pas à nous occuper de ce côté de la question.

nir une base — les points-événements ; mais pratiquement cette base aurait pu être quelconque, seul aurait varié le degré de complexité des relations. La théorie de la relativité ramène tout, en physique, à des relations ; autrement dit, c'est la structure, non la substance, qui compte. La substance est indispensable à la structure mais sa nature n'a aucune importance. Nous pouvons à ce propos citer un passage de Bertrand Russell tiré de *l'Introduction to Mathematical Philosophy*.

« On aurait pu éviter de nombreuses et longues discussions philosophiques, si l'on avait bien vu le rôle important que joue la structure et la difficulté qu'il y a d'aller au delà. On dit souvent, par exemple, que l'espace et le temps sont subjectifs mais qu'ils ont l'un et l'autre des contre-parties objectives ; ou encore que les phénomènes sont subjectifs mais qu'ils ont en eux-mêmes les causes qui leur donnent naissance, ces causes différant entre elles comme les phénomènes qu'elles produisent. Là où se rencontrent de pareilles hypothèses, il est généralement admis qu'il nous est impossible d'en savoir long sur la nature des contre-parties objectives. En réalité, si de telles hypothèses, telles qu'elles sont exposées, étaient correctes, ces contre-parties objectives formeraient un Univers ayant la même structure que l'Univers des phénomènes... En résumé, toute proposition ayant une signification que nous puissions communiquer à d'autres êtres pensants, doit être vraie à la fois dans ces deux sortes d'Univers, ou bien alors dans aucun : la seule chose qui permet de distinguer ces deux Univers c'est précisément cette essence d'individualité qui sans cesse échappe à nos mots et se dérobe à notre description, et qui, pour cette raison, est étrangère à la science ».

Voici la position actuelle de notre théorie. — Nous avons un Univers de points-événements avec leurs relations d'intervalle primordiales. Celles-ci servent à construire mathématiquement un nombre illimité de relations plus compliquées qui décrivent les différents caractères des états de l'Univers. Ces relations existent aussi nombreuses dans la nature que les sentiers en nombre illimité que l'on peut imaginer sur une lande nue et désolée. Mais l'existence de ces sentiers est en quelque sorte à l'état latent ou virtuel jusqu'à ce que quelqu'un traversant la lande vienne à donner à l'un d'eux, celui qu'il a suivi, sa

signification réelle. De même, l'une quelconque de ces relations ne prend une signification qui la caractérise qu'au moment où l'intelligence humaine vient à la choisir. L'esprit, tel un filtre, laisse passer la matière et arrête la foule confuse et insignifiante des autres qualités, de même que le prisme laisse filtrer les pures couleurs de l'arc-en-ciel parmi le chaos des vibrations de la lumière blanche. L'esprit exalte le permanent, il ignore le transitoire ; comme le montre l'étude mathématique de ces relations, notre esprit n'a qu'un moyen de se satisfaire ; c'est de choisir une qualité particulière comme la substance permanente de l'Univers de nos sensations, en effectuant dans l'espace et le temps que nous percevons une division assurant cette permanence ; une conséquence nécessaire de ce véritable choix de Hobson, c'est que les lois de la gravitation et de la mécanique et la géométrie doivent s'y trouver satisfaites. Est-il exagéré de dire que c'est notre esprit qui, en recherchant la permanence, a créé l'Univers de la physique ? Et que par suite l'Univers de notre perception n'aurait pas pu être différent de ce qu'il est ⁽¹⁾ ?

Cette dernière phrase va peut-être un peu loin, mais elle nous montre bien la direction vers laquelle tendent toutes ces vues. La théorie plus générale de Weyl sur les relations d'intervalle montre de la même manière que les lois de l'électrodynamique dépendent simplement de l'identification d'une autre chose permanente — la charge électrique. Dans ce cas, l'identification est due, non pas à l'intelligence rudimentaire du sauvage ou de l'animal, mais à la puissance de raisonnement du savant. La conclusion que nous pouvons tirer de tout cela, c'est que les lois de la nature que nous avons fait entrer dans un schéma unique — mécanique, gravitation, électrodynamique, optique — ont leur origine non pas dans un mécanisme spécial de la nature, mais dans notre esprit lui-même.

« Donnez-moi de la matière et du mouvement », aurait dit

⁽¹⁾ Ce résumé a pour but de montrer la direction vers laquelle tendent, à mon avis du moins, les vues que nous suggère la théorie de la relativité, plutôt que d'exposer d'une manière précise ce que nous avons établi. Je sais qu'il y a, à l'heure actuelle, de nombreuses lacunes dans notre argument, de sorte que toute cette partie de la discussion doit être regardée comme ayant un caractère plus suggestif que dogmatique.

Descartes, « et je vous construirai l'Univers ». La raison retourne cette phrase et dit : « Donnez-moi l'Univers — un Univers comportant des relations — et je vous construirai matière et mouvement ».

N'y a-t-il pas alors de lois véritables dans l'Univers extérieur ? Des lois inhérentes au substratum des événements et qui se dégagent de phénomènes réglés par ailleurs par le despotisme de notre esprit ? Nous ne pouvons prédire quelle sera la réponse définitive ; néanmoins, aujourd'hui, nous devons admettre l'existence de lois qui semblent avoir leur siège dans l'Univers extérieur. La plus importante de ces lois, sinon la seule, c'est la loi de l'atonicité. Pourquoi cette qualité de l'Univers qui distingue la matière du vide n'existe-t-elle qu'en certains points de concentration appelés atomes ou bien électrons, tous de masse comparable ? D'où provient cette discontinuité ? Pour le moment, il semble qu'il n'y ait aucune raison nous autorisant à regarder cette discontinuité comme une loi due à notre esprit, car lui-même a plutôt de la peine à faire disparaître les discontinuités de la nature pour y substituer la perception du continu. Nous sommes obligés de supposer qu'il y a dans la nature des choses une cause à cette concentration en atomes. Il est probable que notre décomposition en points-événements n'est pas la dernière que nous puissions faire ; si nous pouvions pousser notre analyse et atteindre quelque entité encore plus fondamentale, peut-être alors l'atonicité et les autres lois de la physique apparaîtraient-elles comme des identités. C'est là, à vrai dire, la seule explication définitive que puisse accepter le physicien. Mais cette analyse plus complète et plus définitive n'est pas sur le même plan que celle qui nous a permis d'atteindre le point-événement. L'Univers *peut* être ainsi constitué que les lois de l'atonicité y soient réellement des lois nécessaires ; mais, tant que l'esprit joue un rôle, il semble n'y avoir aucune raison pour que l'Univers ait cette constitution. Nous pouvons fort bien l'imaginer autrement. L'argument sur lequel nous nous sommes appuyés jusqu'ici, c'était que l'on pouvait, quelle que soit la constitution de l'Univers, trouver des combinaisons des choses, obéissant aux lois de la mécanique, de la gravitation et de l'électrodynamique, ces combinaisons étant toutes prêtes à jouer le rôle d'un Univers de perception

pour une intelligence en harmonie avec elles ; de plus, tout Univers de perception d'une nature différente, notre raison doit le rejeter comme non substantiel.

Il y avait autrefois un vieil économiste de collège qui vivait cloîtré chez lui et qui se consacrait entièrement à ses comptes. Il avait coupé tous les liens qui l'unissaient avec l'extérieur et il ne se faisait une idée de l'activité et de la vie intellectuelle du collège que d'après les reflets qui lui en venaient à travers ses notes. Ses comptes à lui, c'était son Univers ; chacun des différents items revêtait dans son esprit une individualité. Au fond de lui-même se peignait vaguement une réalité objective — parallèle en quelque sorte au collège réel — dont il n'avait notion que par les livres, les shillings et les pence, c'est-à-dire les liens qui l'unissaient à cette réalité. Faire ses comptes, c'était devenu pour lui une habitude inévitable que lui avait léguée une longue lignée d'économistes qui, comme lui, vivaient en ermites ; et il ne se figurait pas qu'il était pour quelque chose dans cette habitude ; il lui semblait impossible que ses comptes pussent être disposés autrement qu'ils ne l'étaient. Il avait pourtant une tournure d'esprit scientifique et il voulait en savoir plus long sur le collège — l'Univers de ses comptes. Un jour, en vérifiant ses livres, il fit une découverte sensationnelle. A chaque item qui apparaissait du côté « Avoir » correspondait quelque part dans la colonne « Doit » un item égal. « Ah ! », dit l'économiste, « j'ai découvert une des grandes lois qui régissent le collège. C'est une loi rigoureuse et parfaite de la nature, qui ne souffre aucune exception. Tout ce qui est « Avoir » doit être affecté du signe plus, tout ce qui est « Doit » du signe moins ; nous obtenons ainsi la loi de la conservation des livres, shillings et pence. Je ne vois pas les limites qui peuvent borner mes recherches ; et bientôt, je commencerai à comprendre pourquoi chaque jour le coût de la vie augmente ».

Comme l'économiste, il se peut que nous ayons eu tendance à confondre les lois économiques avec les lois de nos comptes — les lois qui dirigent l'évolution de l'Univers extérieur et celles qui proviennent de la superposition des différents aspects sous lesquels il nous apparaît. Là où la physique a obtenu ses succès les plus grands, c'est dans la découverte de lois qui en grande partie, je crois, appartiennent à la seconde catégorie, celle des

lois subjectives. Il n'y a aucune raison de mettre en doute que la physique ne soit capable de découvrir les lois de la première catégorie ; mais jusqu'ici bien peu de progrès ont été faits sur cette route rocailleuse.

Si l'atomicité dépend de lois inhérentes à la nature, il semble à première vue difficile de comprendre la raison pour laquelle elle intéresse spécialement la matière, puisque la matière ne joue pas un rôle essentiel dans le schéma analytique et qu'elle ne doit son importance qu'à des considérations étrangères apportées par l'esprit. Nous avons vu, cependant, que l'atomicité ne se confinait pas uniquement à la matière et à l'électricité ; le quantum dont l'importance est tellement capitale dans la physique moderne, est en apparence un atome d'action. On ne peut donc accuser la nature d'être de connivence avec l'esprit pour singulariser la matière. L'action passe généralement pour la chose la plus fondamentale de l'Univers réel de la physique, bien que l'esprit la néglige par suite de son manque de permanence ; on a une vague conviction que l'atomicité de l'action doit être la loi générale, et que de cette loi doit dépendre d'une manière ou d'une autre l'apparence des électrons. Mais les physiciens n'ont pas encore pu formuler d'une manière précise la théorie des quanta d'action.

Il y a un contraste frappant entre le triomphe de l'esprit scientifique qui expose le grand schéma général des lois de la nature, toutes ramenées aujourd'hui au principe de moindre action, et cette défaite que lui infligent les phénomènes extrêmement généraux découverts récemment, relatifs à la loi d'atomicité des quanta. Il est trop tôt pour proclamer son échec dans ce dernier cas ; mais il se pourrait tout de même que le contraste ait une signification. C'est déjà quelque chose que l'intelligence humaine ait su extraire des phénomènes de la nature les lois qu'elle y avait elle-même placées ; il se peut qu'il lui soit bien plus difficile d'en extraire les lois qui ne furent jamais de son domaine. Il est même possible que les lois qui ne tirent pas leur origine de notre esprit, soient inintelligibles et que nous ne réussissions jamais à les énoncer. Ce n'est pourtant qu'une éventualité lointaine ; il est probable que si ces lois avaient été réellement inaccessibles à notre raison, nous n'aurions même pas pu faire progresser la science comme nous l'avons fait, si

limités ces progrès soient-ils. Mais si les lois des quanta créent vraiment une distinction entre l'Univers réel et tout autre Univers que nous puissions concevoir, nous pouvons nous attendre, si nous voulons les énoncer, à rencontrer des difficultés auprès desquelles toutes celles que la physique nous a présentées jusqu'à ce jour, ne sont rien.

La théorie de la relativité a passé en revue tous les sujets de la physique. Elle a unifié les grandes lois qui, par la précision dans la forme et la rigueur dans l'application, ont conquis dans la science humaine la place d'honneur que la physique occupe aujourd'hui. Et pourtant, en ce qui concerne la nature des choses, cette science n'est qu'une forme vide — un échafaudage de symboles. C'est la science de la structure et non celle de la substance. Tout l'Univers de la physique est rempli par cette substance inconnue qui, sans aucun doute, doit être l'objet de nos sensations. C'est là un aperçu des points de vue grandioses que nous offre cet Univers physique mais que nous ne pouvons atteindre par les méthodes de la physique. De plus, nous avons trouvé que là où la science a fait les progrès les plus marqués, l'esprit n'a fait que retirer de la nature ce qu'il y avait introduit lui-même.

Nous avons découvert l'étrange empreinte d'un pas sur le rivage de l'Inconnu. Pour expliquer son origine nous avons bâti théories sur théories, toutes plus ingénieuses et plus profondes les unes que les autres. Nous avons enfin réussi à reconstituer l'être qui laissa cette empreinte, et cet être, il se trouve que c'est nous-même !